

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2024.4.NO.149

目次

センターの活動状況	①
TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発 ～製作性と閉じ込め性の課題への挑戦～	③

センターの活動状況

運営状況

第 41 回理事会の開催

2024 年 3 月 5 日（火）に対面及び Web 会議システムの併用により開催した第 41 回理事会において、以下の議案を付議し、それぞれ原案のとおり承認可決されました。

1. 2024 年度事業計画及び収支予算並びに資金調達及び設備投資の見込みの承認について
2. 原環センター創立 50 周年記念事業計画の承認について
3. 第 30 回評議員会の招集について

第 30 回評議員会の開催

2024 年 3 月 12 日（火）に対面及び Web 会議システムの併用により開催した第 30 回評議員会において、以下の議案を付議し、それぞれ原案のとおり承認可決されました。

1. 2024 年度事業計画及び収支予算並びに資金調達及び設備投資の見込みの承認について
2. 評議員の選任について
3. 理事の選任について

今回選任された方は次ページのとおりです。

(敬称略)

区 分	退 任 者	新 任 者	新任者所属・役職
評議員（非常勤）	—	新堀 雄一	東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 教授
理事（非常勤）	—	出光 一哉	東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター 特任教授

(備考) 新堀氏は2023年8月3日にご逝去された小島圭二評議員の後任として、出光氏は2023年6月26日に任期満了により退任された石樽顕吉理事（非常勤）の後任としてそれぞれ選任されました。

国際交流

NAGRA との情報交換

2024年2月22日に、スイスNAGRA（放射性廃棄物管理共同組合）のInternational Services & Projects部のHerwig Muller氏及びStratis Vomvoris氏を迎え、情報交換会議を開催しました。

スイスではNAGRAが、2022年9月に地層処分場サイトとして北部レゲレンを提案しています。会議では、Muller氏から北部レゲレンでの処分場建設に向けた、処分場レイアウトの検討などの準備状況、今後取得することが必要な許認可などに関する説明がありました。その後、同じくMuller氏から北部レゲレンを選定するために行った地上からの調査について説明がありました。特に、地上からの調査の一部として行ったボーリング調査に関して、実施場所の選定方法や取得したコアの分析・評価方法、取得したデータの種類やその解釈などについて、詳しく説明していただきました。

最後に今後も様々な分野で情報交換を進め、協力を深めていくことで合意いたしました。



ホームページの全面リニューアル

原環センターのホームページの全面リニューアルを行いました。

今回の全面リニューアルでは、より使いやすく、分かりやすいホームページを目指し、デザインを見直しました。また、スマートフォンやタブレット端末での表示にも対応し、各デバイスから快適に閲覧できるように改善しました。

これからも放射性廃棄物処分に関する正確な情報の発信に努めて参ります。

新しくなったホームページをご覧ください。

(URLの変更はありません)

<https://www.rwmc.or.jp/>



TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発 ～製作性と閉じ込め性の課題への挑戦～

地層処分バリアシステム研究開発部
藤井 直樹 丸山 紀之

1. 背景

TRU 廃棄物（表-1）の処分では、廃棄体と一体化された廃棄体パッケージを地上施設で製作して、それが地下の処分坑道に搬送、集積定置される。ここで、廃棄体パッケージは、図-1 のような複数の廃棄体（ドラム缶やキャニスタ）を鋼製の容器にセメント系材料等のパッケージ内充填材とともに固化、一体化したものと定義されている。廃棄体を収納する鋼製容器だけを示す用語でないことに注意いただきたい。

廃棄体パッケージには、閉鎖前の安全性の要求事項として、作業時の放射性物質の漏えい防止が設定されているとともに、その工学的成立性の要求事項として、実現可能な建設・操業・閉鎖の作業工程の方法、実証された技術の適用が設定されている。

TRU 廃棄物は、高レベル放射性廃棄物に比べて廃棄体の発生量が多く、その大部分は発熱量が低い。そのため、第1次 TRU レポート¹⁾では、処分場の効率性・経済性を考慮して、比較的大きな処分坑道に廃棄体パッケージを集積定置する処分概念が示され、定置の効率と作業のハンドリングを考慮して、角型の金属容器にドラム缶をモルタル充填する形状

の、現在の廃棄体パッケージ A の原型が示された。ただし、安全機能等はまだ具体化されていない。

その後、第2次 TRU レポート²⁾において、角型金属容器に複数の廃棄体をモルタル充填する廃棄体パッケージ A の概念が示され、要求事項として、操業中の定置作業の効率化および操業中の核種漏えい

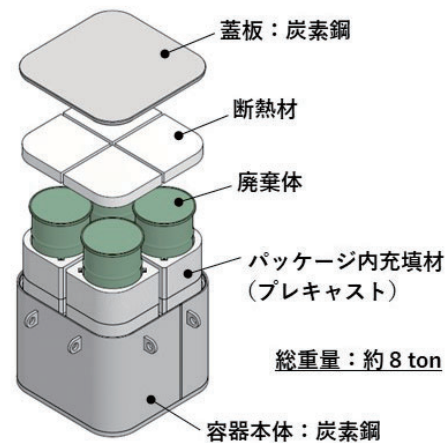


図-1 TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの例

表-1 TRU 廃棄物の特徴

廃棄物の種類	TRU 廃棄物				
	廃銀吸着材	燃料の部品	低レベル濃縮廃液	可燃、難燃、不燃廃棄物	
	グループ1	グループ2	グループ3	グループ4L (低発熱性)	グループ4H (発熱性)
特徴	人工バリアや母岩などへの吸着性が低く、環境中の被ばく線量が最大の長寿命核種の放射性ヨウ素 (I-129) を多く含む。	溶解度が高く人工バリアや母岩などへの吸着性が低い長寿命核種の放射性炭素 (C-14) を多く含む。	硝酸塩を含む。アスファルト固化体は硝酸塩と有機物とが混在するため、外部からの熱による反応促進の可能性。	発熱量の低い雑多な廃棄物。	ガラス熔融炉からのハツリガラスなど発熱量の高い廃棄物。
含まれる核種	¹²⁹ I	AP: ¹⁴ C, ⁶⁰ Co, ¹²⁵ Sb, U, Pu, FP, MA	U, Pu, FP, MA		U, Pu, FP, MA
固化方法	(レファレンスは) セメント固化	【圧縮充填】	モルタル固化、セメント固化及びアスファルト固化	モルタル固化、セメント固化	モルタル固化、セメント固化
廃棄体の形態	(レファレンスは) ドラム缶	キャニスタ	ドラム缶	ドラム缶、角型容器	ドラム缶、インナーバレル、ハル缶

防止が機能として付された。一方で、廃棄体パッケージ A には上蓋がなく、閉鎖後長期の核種閉じ込め等は設計上考慮されていない。

これらの経緯を踏まえ、NUMO の包括的技術報告書³⁾では、廃棄体パッケージの設計要件として、閉鎖前の安全性の要求事項である「廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止」を確保するための「耐食性」、「構造健全性」が、工学的成立性の要求事項の確保に必要な「製作性」、「遠隔封入性」、「遠隔定置性」が設定された。これに加え、閉鎖後長期の安全性の要求事項として、放射性物質の溶出の抑制が新たに設定された。具体的には、廃棄体が定置されるニアフィールドの過渡的な期間として考えられる 300 年を目安として、閉鎖後の耐食性および構造健全性が評価項目として設定された。これらの要件を満たす廃棄体パッケージとして、第 2 次 TRU レポートで示された廃棄体パッケージ A に加えて、クレーンでの定置を想定して、上蓋を取り付けた鋼製の廃棄体パッケージ容器に、廃棄体を溶接封入して、閉鎖後 300 年程度の放射性物質の閉じ込め性を有する廃棄体パッケージ B の概念が示された。図-1 はその廃棄体パッケージ B の一例である。

また、TRU 廃棄物には、ハル・エンドピースの圧縮体であるグループ 2 やグループ 4H に区分される高線量、高発熱量の廃棄物やグループ 3 に区分され硝酸塩と有機物が混在し、外部の熱による反応促進の可能性があるために制限温度が設定されているアスファルト固化された廃棄物等の様々な種類の廃棄物が存在する(表-1 参照)。そのため、廃棄体パッケージは各グループの廃棄物特性に応じた設計をする必要がある。

2. 目的

このような背景を踏まえ、操業期間中の安全性と閉鎖後 300 年程度までの放射性物質の閉じ込め性能が期待できる廃棄体パッケージ B について、実証的な試験等を実施して工学的な成立性や安全性(操業時、閉鎖後)等の向上を図り、製作技術を整備することを目的とした研究開発を実施した。

3. 課題と研究開発のポイント

廃棄体パッケージ B では、閉鎖後 300 年程度の閉じ込め性を持たせたということで、閉じ込め性に影響を及ぼす事象をできるだけ排除することが最も重要な課題である。閉じ込め性に影響する事象として以下の三点が挙げられる。

- 溶接部の応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking)
- 内部ガス圧の増加
- 異常時 (落下など) の衝撃

これらの発生事象を取り除く、または、できる限りその影響を小さくできるように課題を具体化して、廃棄体パッケージの設計・製作技術に反映させることを本研究開発のポイントとし、まずは製作技術に焦点を当てたため、落下事象の対策までは現時点では考慮していない。

SCC の発生因子としては、材料・環境・力学の 3 つの要因がある。TRU の廃棄体パッケージの場合は、材料については炭素鋼の母材と溶接部(溶材の化学成分や金属組織の違い)が影響する。環境については、充填材や構造材に多くのセメント系材料が使われるため、そのセメント系の材料と地下水の成分が影響する。力学については、SCC の発生要因となるのは引張応力であり、特に溶接部の引張残留応力がその要因となる。

そのため、環境と材料の観点から、搬送・定置時(大気環境)、パッケージ間充填材の打設(セメント環境)、地下水の浸潤と酸素の枯渇(酸化性雰囲気から低酸素雰囲気)、セメント系材料の劣化(中性化)を設定し、炭素鋼の SCC 感受性領域から SCC 生起の可能性を評価した。TRU 廃棄物処分環境で廃棄体パッケージが取り得ると考えられる電位-pH 領域と、炭素鋼が SCC 感受性を有するとされる代表的な電位-pH 領域を重ね合わせると、図-2 に示すように、電位-pH の領域が重なる部分が存在するため、SCC 発生 of 潜在的な懸念は否定できない。

そのため、SCC による破損確率を下げるためには、SCC 発生要因となる引張残留応力をできるだけ低減する必要がある。したがって、製作時の課題は、溶接後熱処理 (PWHT: Post Weld Heat Treatment) により、SCC 発生因子である引張残留応力を低減させることである。

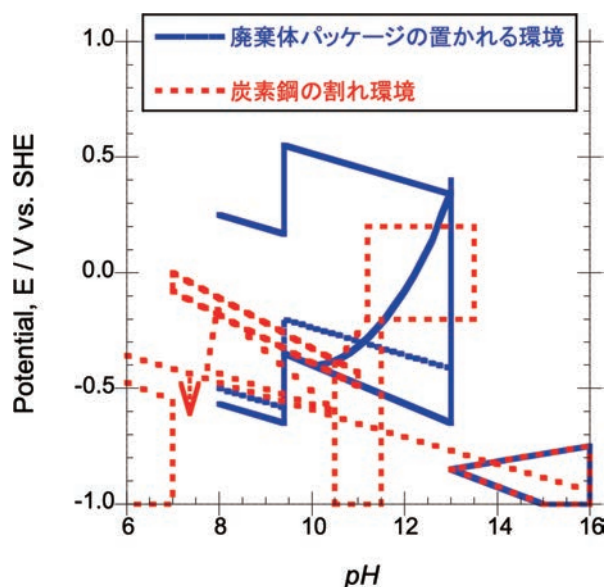


図-2 TRU 廃棄物処分環境下での炭素鋼の SCC 感受性領域

ただし、PWHTの施工においては、廃棄体への熱影響は避けられない。一方で、廃棄体パッケージへの熱影響として、グループ3のアスファルト固化体は、アスファルトと硝酸塩との反応で熱反応暴走を起こす可能性があるため、その熱反応暴走の開始温度とされる195℃が制限温度とされている。したがって、製作時の課題は、制限温度の制約があるアスファルト固化体にも対応するために、PWHTの施工により残留応力を低減しつつ、入熱条件が緩く、局所的な入熱が可能なPWHTの方法や、廃棄体パッケージの内部への断熱材の適用によって熱影響の低減させることである。

内部ガス圧の増加は、TRU廃棄物のうち、グループ2やグループ4H等の高発熱量、高線量の廃棄体を廃棄体パッケージに封入した際、パッケージ内充填材等から放射線分解ガスが発生することにより生じる。このように放射線分解の発生要因となりうる廃棄体パッケージ内充填材については、廃棄体パッケージBの場合、放射性物質の閉じ込めや構造健全性の要件をパッケージ容器に求めているため、操業期間中の放射性物質の漏えいの防止や閉鎖後の地下水の浸入の抑制や収着による放射性物質の溶出を抑制する機能は求められていない。そのため、パッケージ内部は未充填、砂充填、セメント系材料充填の場合が考えられるが、現段階ではこれらに優劣はなく、廃棄体の性状によってより適したものを使い分ける方針である。本研究開発では、配合設計の最適化などの技術開発課題があるセメント系材料を対象に検討を実施した。

セメント系パッケージ内充填材を使う際には、内圧上昇により閉じ込めが必要な期間において容器の開口等が生じないように、工学的な対策によって放射線分解ガスを低減させる必要がある。そのため、セメント系材料のガス発生挙動を把握するための試験として、セメント種類や乾燥条件（試料中の水分量、水の存在状態）が異なるセメントペースト試料、骨材や混和剤を含んだ試料での照射試験を実施し、放射線分解による水素ガス発生量を測定した。

ここで、セメント系材料中の水は一般に、水和物の形で存在するような結合水と、空隙中に水分子の形で存在する自由水が存在する。よって、それらの和が全水分量となる。照射試験の結果から、図-3に示すように、セメント系材料の全水分量とガス発生量の関係から、放射線分解に寄与するのは自由水量であり、セメントの種類にはそれほど依存しないことを確認した。

したがって、製作時の課題は、セメント系内部充填材の施工・製作時において乾燥処理等により自由水量を低減させることである。

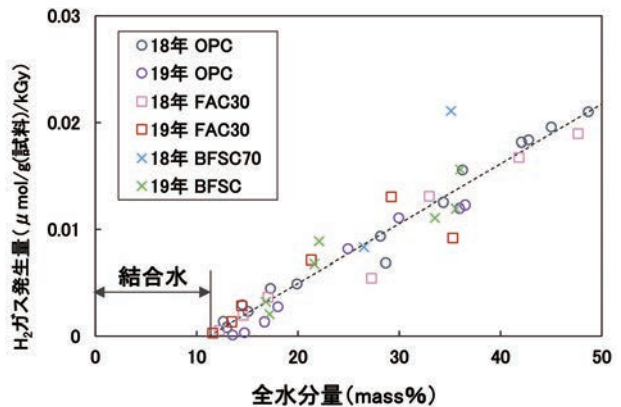


図-3 セメント系材料のガス発生特性

以下では、これらの主要な課題に加えて、実際の製作において生じる様々な課題に対する廃棄体パッケージ製作過程で必要な対策を含め、廃棄体パッケージの製作確認試験等で得られた個別の製作技術を紹介する。

4. 廃棄体パッケージの製作技術

廃棄体パッケージの製作性と閉じ込め性の課題に向け、まず製作技術を整備するため、製作工程図を作成し、各工程において個別の要素試験や評価を重ね、候補技術の適用性について検討してきた。それらを踏まえ、実際の大きさ及び重量を模擬した廃棄体パッケージの製作確認を実施した。

この製作確認は、鋼板の曲げ加工から蓋溶接後のPWHT施工に至る一貫した製作を実施することで、各工程の製作性や施工性について実証的に確認し、また、実際に製作することで見てきた改善点や今後の課題を抽出することを狙いとした試験であり、言わば挑戦でもある。

製作するに当たり、以下の基本条件を設定した。

- ①対象とする廃棄体パッケージは、NUMO-SCの「廃棄体パッケージB(a)」(ドラム缶用)とする。
- ②使用する材料は、市中で入手できるものとし、廃棄体パッケージの容器については炭素鋼、パッケージ内充填材についてはセメント系材料とする。
- ③廃棄体パッケージの容器形状は、角形容器でドラム缶4個を収納するものとし、容器中央に十字鋼板を設け胴板及び底板に溶接して固定する。
- ④外圧10MPaに耐える容器として、容器本体(胴板・底板・蓋板)は、板厚50mmでSM570の降伏応力(430MPa)以上を有する材料とし、十字鋼板は、板厚32mmでSM490YB(355MPa)以上の降伏応力を有する材料とする。
- ⑤腐食代は、NUMO-SCに記載されている処分坑道内の地下水による冠水が完了するまでの過渡的な期間である300年の最大腐食深さ(5.3mm)とし、この期間の耐食層としての閉じ込めは溶接により

確保する。なお、孔食も含めた最大腐食代は8mm程度と見なし、閉じ込め性確保としての溶接深さを10mmとする。

⑥アスファルト固化体の熱的制限値を195℃とする。廃棄体パッケージの容器本体の製作は、図-4に示すように、圧延鋼板をコの字状にプレス曲げたものを突合せ溶接することで箱型にし、底板を溶接したのち、容器内側を4区画になるよう十字鋼板を溶接で取り付ける。

容器本体の製作では、容器内に挿入するパッケージ内充填材とのクリアランス（5mmに設定）を確保する必要がある。そのため、所定の寸法公差内で製作するため、プレス曲げ加工では、スプリングバックを考慮した狙い値の設定やプレスによる減肉量の管理、クラックや割れ、R止りのズレ防止といった施工管理を実施し、溶接組立では、溶接熱による変形やゆがみの制御するための溶接治具（ストロングバック、突っ張り棒）の使用や開先形状の最適化といった対応策を講じて製作した。



図-4 容器本体の製作状況

セメント系材料を用いた廃棄体パッケージ内充填材については、現時点では、図-5に示すように、「先打設」、「後打設」、「プレキャスト」の3つの施工方式が考えられている。

セメント系材料からのガス発生という課題については、セメント系材料の自由水量を低減することでガス発生量が低減できることを本研究開発の要素試験を通して見出しており、自由水は製作時に乾燥工

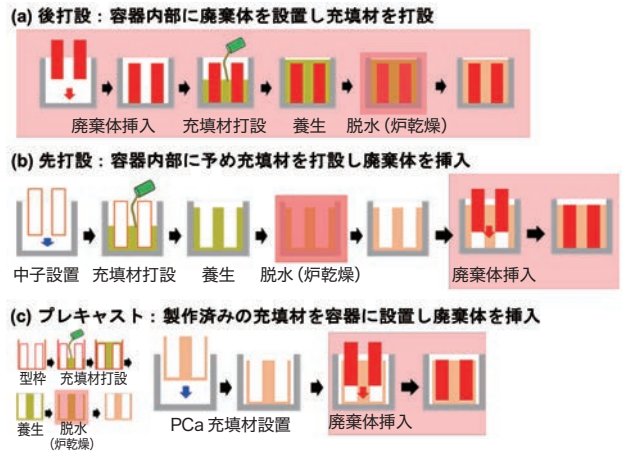


図-5 廃棄体パッケージ内充填材の製作方法

程を設けることで低減できることを確認している。そのため、製作時に製品単体での乾燥が可能な「プレキャスト」方式を採用した。

形状は、容器との取合い部に注意し形状及び寸法を決定し、成形方法は、製作時のハンドリング、乾燥時の水分の抜けやすさ、変形に伴う影響を加味し、図-6のように側面部、底部をそれぞれ成形する分割型とした。

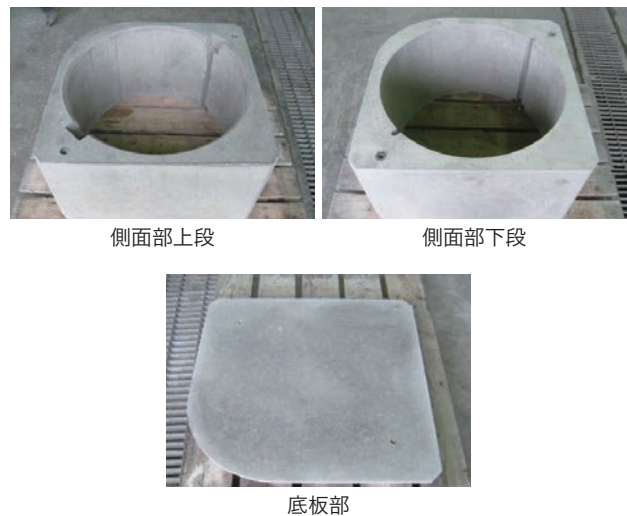


図-6 プレキャスト方式による廃棄体パッケージ内充填材

容器に収納する内容物の一つに断熱材がある。これは、PWHT施工時の廃棄体への熱影響を低減することを目的としており、市中で入手できる候補材料の中から、最も断熱性能が高く加工性も良い「マイクロサーム」を選定した。容器内の設置方法については、伝熱解析により、容器内部の廃棄体上部の空間全てに断熱材を設置することで、廃棄体の最高到達温度が150℃に収まることを確認している。

設置後の各部材同士のすき間は、図-7のように、挿入時の誤差による設置位置の偏りは見られたものの、干渉もなく安定して設置することができた。



図-7 内容物の挿入及び設置状態

蓋板の溶接方法については、実用化されている溶接方法の中から、溶接品質が最も優れるティグ溶接を選定し、6層6パスの積層で溶接した。図-8のように、各層施工後の溶接ビードの仕上がり状態は良好で、目視による外観不良もなかった。なお、蓋板の溶接前に予め蓋内面及び容器内側面に貼り付けた熱電対から取得した温度履歴のデータから、溶接施工中の容器内面側の温度は、最高でも80℃程度であることを確認した。

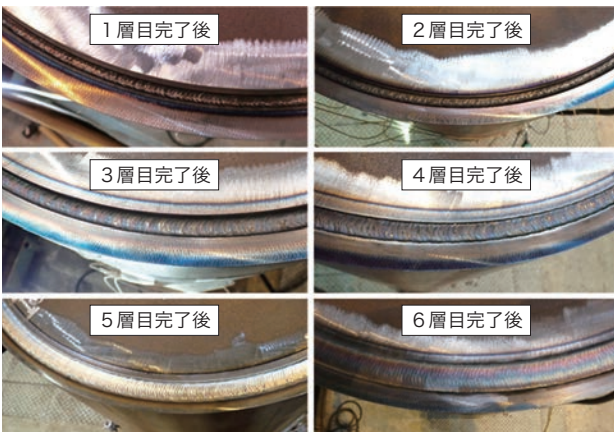


図-8 溶接施工状況と溶接ビードの外観

この蓋板溶接では、融合不良等の内部欠陥の発生が想定され、かつ放射線環境下での施工となることを考慮すると、蓋溶接後の非破壊検査は、超音波探傷試験(UT: Ultrasonic Testing)が最適である。そこで、高レベル放射性廃棄物の処分容器(オーバーパック)での非破壊検査の開発事例を参考に、「クリーニング波法」と「フェーズドアレイ法」の2つの手法について適用性確認試験を実施し、溶接ビードの影響のない容器側面から探傷する「フェーズドアレイ法」を採用することにした。

非破壊検査は、図-9のように、手動走査により探傷を実施した。

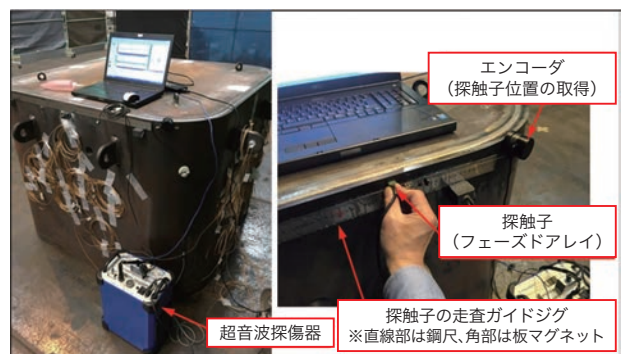


図-9 非破壊検査の実施状況

検査の結果、欠陥と思われるエコーは確認されなかったものの、検査部位の表面状態(側板の突合せ溶接の研削処理部、打痕部分、スパッタ付着部分)によって、エコーに若干の乱れが発生することを確認した。

前述のように、廃棄体パッケージには閉鎖後300年間の閉じ込め性が求められる。そのため、蓋溶接で生じた引張残留応力は、SCCの発生を誘発する恐れがあるため、改善しておく必要がある。

残留応力の改善は、図-10のように、高周波誘導加熱コイルによるPWHTで実施した。ただし、今回の施工に当たっては、電気設備的な問題や角型形状での全周の温度調整の難しさといった課題が要素試験で見出されており、図-11のように、全周を2回に分けて加熱する方法を採用した。

この施工方法では、図中の「○」の箇所において加熱部がオーバーラップする事が避けられないため、その部位の熱影響や温度履歴の管理については、今後、精査する必要がある。

PWHTの施工条件は、表-2に示すJISに基づいた条件を基本として1回目の施工を実施し、その結果を受けて、加熱温度やコイルのクリアランス等を調整したのち、2回目の施工を実施した。

PWHT施工による廃棄体への熱影響については、予め模擬廃棄体に貼り付けた熱電対から取得した温

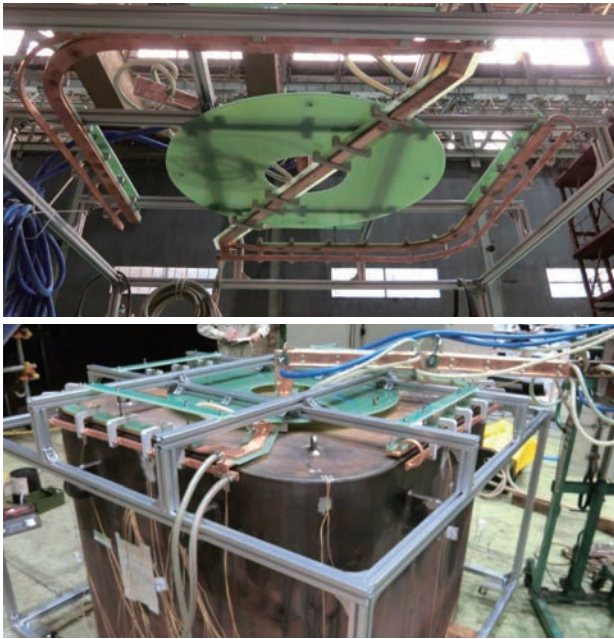


図-10 高周波誘導加熱コイルによる PWHT

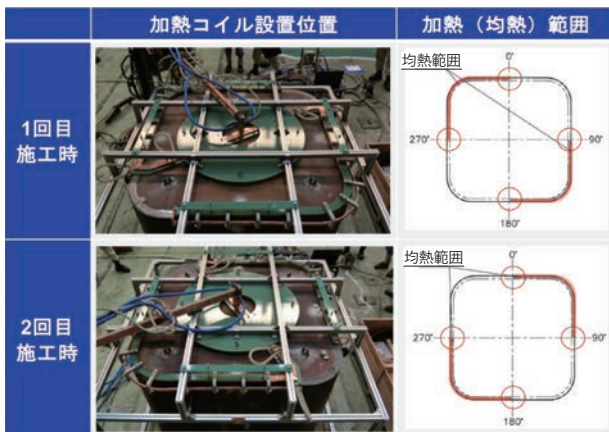


図-11 高周波誘導加熱コイルの設置位置

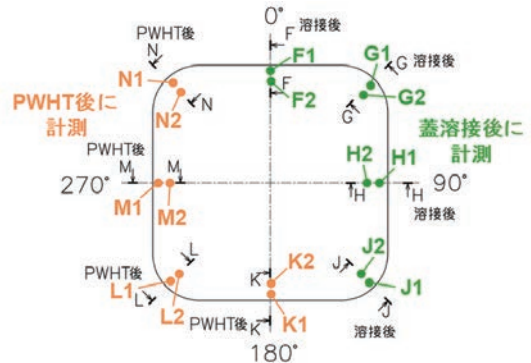
表-2 PWHT の施工条件

	PWHT 施工条件	備考
溶接部厚さ	10mm	
加熱速度	220[°C/h] 以下	JIS Z 3700 より
保持温度	595 ~ 635[°C]	JIS Z 3700 より
保持時間	0.4[h] 以上	JIS Z 3700 より
冷却速度	280[°C/h] 以下	JIS Z 3700 より
管理温度範囲	300[°C] 以上	

度履歴のデータから、1 回目施工時での模擬廃棄体の最高到達温度は 163°C で、2 回目施工時での最高到達温度は 155°C と、いずれもアスファルト固化体の熱的制限値である 195°C はクリアできた。

肝心の PWHT による残留応力の改善については、穿孔法による溶接後と PWHT 施工後の残留応力の計測結果を用いて、蓋溶接後の残留応力が対角にも同程度の値で発生していたと仮定して話を進めると、

図-12 のように、溶接線直交方向に発生していた残留応力は大幅に改善されたものの、溶接線方向の残留応力の改善には大いに課題が残る結果であった。



部位	対応する位置	溶接線方向 (MPa)		溶接線直交方向 (MPa)	
		溶接後	PWHT 後	溶接後	PWHT 後
溶金部	F1 ⇒ K1	230	334	-185	-660
	H1 ⇒ M1	267	547	-207	-513
	G1 ⇒ L1	215	218	-250	-130
	J1 ⇒ N1	263	305	-233	-85
母材部	F2 ⇒ K2	124	160	119	-2
	H2 ⇒ M2	140	255	313	35
	G2 ⇒ L2	226	205	259	-66
	J2 ⇒ N2	218	450	237	9

図-12 残留応力測定結果

今回、製作した容器は、角型形状で溶接部が容器上面の端部に位置しているため、溶接時には蓋の中心部、容器側板及び容器内部の十字鋼板といった低温部から拘束されることで大きな残留応力が生じ、この溶接により生じた残留応力は、PWHT 施工中には一度キャンセルされるものの、PWHT 施工後の冷却過程で、再度、この拘束力により残留応力となったものと考えられる。

そのため、PWHT 施工による残留応力の改善効果をより高めるためには、残留応力を均一に抑えるための冷却過程のシミュレーションなど、容器の構造的な工夫も考慮して検討する必要がある。

また、より効果的な PWHT 施工を行うためには、次のような装置開発も必要である。

- ① 容器全体を均一に加熱するためには加熱開始前や加熱途中での加熱コイルと容器の適切なクリアランス調整
- ② 容器全体の温度を監視しながら温度分布に応じた高周波誘導加熱の出力コントロール、もしくは、クリアランス調整が行えるようなシステムの構築
- ③ 図-12 のような、加熱コイルを複数に分け、それぞれを別々の高周波電源装置で制御するといった装置の開発

5. まとめ

実際に実規模の廃棄体パッケージを製作したことで、机上で策定した製作方法や要素試験で検討した製作性について実証的に確認でき、今後に繋がる留意点や改善点といった知見も含めて、廃棄体パッケージの製作技術として提示することができた。

遠隔施工については、今回は装置の開発までは着手しなかったものの、遠隔を想定したうえで人手によって施工することで、実際に遠隔で操作する場合の装置に求められる機能や設備的な問題点などが明確になった。

このように、今回の製作性と閉じ込め性の課題への挑戦を通して、廃棄体パッケージを製作するうえで重要となるポイントは押さえることができ、成果として提示することができた。ここで提示した内容は、容器の形状を問わず類似の廃棄体パッケージにも反映または流用できるものである。

なお、本稿の内容は、平成30年度から令和4年度に経済産業省資源エネルギー庁から受託して実施した高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597）TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発⁴⁾・⁵⁾の成果の一部である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構・電気事業連合会共同作業チーム，TRU廃棄物処分概念検討書，JNC-TY1400 2000-001，TRU TR-2000-01，2000。
- 2) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発とりまとめ－，JNC-TY1400 2005-013，FEPC TRU TR2-2005-2，2005。
- 3) 原子力発電環境整備機構，包括的技術報告，わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティーケースの構築—，NUMO-TR-20-03，2021。
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター，日本原子力研究開発機構，令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書，2023。
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター，日本原子力研究開発機構，令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU廃棄物処理・処分技術高度化5か年成果報告書，2023。

（本稿は、2023年12月8日に開催した2023年度原環センター研究発表会の研究発表「TRU廃棄物の廃棄体パッケージの開発～製作性と閉じ込め性の課題への挑戦～」に基づいて作成したものです。）

質疑応答

質問1 セメント系のパッケージ内充填材の自由水量の低減化が一つの課題とのことだが、周囲からの熱により、セメント系材料に含まれる水分も上昇するのではないかと思う。その時に、それをきちんとした管理でガスを取り除くことは可能か。

回答1 セメント系材料のガス発生特性を活かし、製作技術として水分量（自由水量）を低減させることでガス発生量を低減できるのではないかと、ということを経験した。実際、吸湿の条件によって乾燥させた後に水分を吸収してガス発生量が増加することは考えられる。そのため、施工管理上どのように充填材の品質を確保するかに着目した。今回、最も水分の管理が容易な方法として、プレキャスト材を選定した。プレキャスト材は先にセメント系材料の充填材を製作して、それを容器に挿入するやり方であるが、一方で、もともと自由水量が少ないセメント系材料を使う発想もある。そういう材料の場合は、例えば乾燥工程の必要としない後充填方式でも水分量を減らすという対策も可能である。今現在検討しているこの課題に取り組んでいる。

質問2 廃棄体パッケージについて説明して頂いたが、既に検討されているのではないかとと思うが、蓋の構造について、例えば煎餅の缶のように蓋を中に入れるのではなく外から被せるという方法もあると思うが、もし可能でしたらまたご説明頂ければと思う。

回答2 そのような蓋の構造ができれば、むしろ理想的だと思うが、製作性を考慮すると若干難があるため、今回はこのような蓋構造にしたという経緯がある。

質問3 今回はセメント系の充填材をやられているが、砂充填とセメント系充填とあるが、具体的にこういう場合は砂充填がよく、この場合はセメント系充填がいいなど、具体的にこれはどう使い分けるのか教えて頂きたい。

回答3 基本的にはガス発生量が充填材の場合が一番問題になると考えている。そのため、線量の高いグループ4Hやグループ2に関しては、セメント系材料以外のものも選択肢になるかと思う。一方で、セメント系材料を使うと、後充填方式の場合だと、容器や廃棄物としっかり一体化、固定できるメリットもある。TRU廃棄物は線量の低いものも大部分を占め

るので、そういうものに関してはセメント系材料で問題ないと思われる。ガス発生量見込まれるものに関しては他の材料、砂も水で締め固めると意味がないので、できるだけ充填性を確保しつつ、水を使わない、そのような施工ができるのであれば、砂充填も可能である。未充填は、ガスの発生という意味では心配いらぬが、で残った空隙が閉鎖後長期にどのような影響を与えるのか、評価する必要があるとともに、小さい空隙が多量に存在する構造をまともに評価することは簡単ではない。従って、未充填という選択肢を取り得る可能性はあるが、評価の観点で難しい点も残ると考えている。

質問4 今後の課題として、異常事象に対する安全性の評価をするということだが、恐らく地上施設での封入過程や運搬中での取扱い事故など、さまざまな異常事象が想定されると思う。ここの安全性の評価は、いわゆる解析的に実施するのか、それとも使用済み燃料のキャスクと同じように、実際の落下試験を伴う評価を行う予定なのか、どのような見通しなのか。

閉じ込め性能を閉鎖後300年担保するというお話があったかと思えます。一般に、例えば溶接部の健全性など、さまざまな評価をされていますけれども、いわゆる一般の工業界に比べて、非常に長い期間閉じ込め性を担保するということですので、長期間にわたる溶接部や容器そのものの劣化と、閉じ込め性の担保に関して、どのような試験をやる計画なのか、何か見通しがあれば教えていただけると幸いです。

回答4 異常事象に対する安全性評価としては、令和5年度から実施している事業で、廃棄体パッケージの落下解析について本格的に着手している。先行事業では、簡易モデルによる試解析に留まったが、今回は、きちんとひずみ速度依存性を考慮した材料構成則を、解析モデルに適用し、8mの高さからの落下を想定した解析を行っている。その他の事象については、今後ニーズがあれば展開していきたい。本来、実際の落下試験ができれば整合性がとれるのだが、現在のところ、そのような予定はない。その代わり、なるべく現実に即した材料物性などの工夫をして、実現象に近づければと思っている。

閉じ込め性を担保する上で、一番懸念しているのは、SCCの発生であり、その対策として有効な圧縮残留応力を付与する方法を現在

検討している。今後、腐食による減肉に伴い圧縮残留応力がどのように変化するかといった浸漬試験を計画している。

質問5 UTで検出できない微小欠陥がパッケージの健全性に影響することはないのか。

回答5 これはとても重要で難しい問題で、オーバーバックでも、その検討でかなり悩まれていると思う。一応、今回のUT検査で検出されなかった欠陥については、問題はなく、パッケージの健全性を保てるという前提の下で施工しているが、今後の課題として留意している。

質問6 溶接後熱処理で残留応力の低減を試みているが、熱のかけ方など、課題がまだあると思っている。専門ではないが、残留応力除去には他にも方法があると思っているが、他の方法については検討されているのか。

回答6 これについては、PWHTを適用できない場合のSCC対策として、表面改質により残留応力を改善する技術開発を、現在の事業で本格的に着手する計画である。その結果を乞うご期待ということでお願いしたい。

質問7 パッケージAからBに変更した時に、パッケージ容器本体にR部をつけたのは、加工の点で不利のように思うがなぜなのか。

回答7 角型形状容器の胴部を製作する場合、製作方法として4枚の鋼板を溶接して製作する方法と、鋼板をプレスでコの字状に曲げ加工したものを2つ突き合わせて製作する方法が挙げられる。どちらの製作方法を採用するかはサイズや板厚に依存するが、一般に溶接箇所が多いほど製作コストが高くなる傾向になる。

例として、鉄骨建築構造物に使用する柱材の場合を挙げると、溶接組立箱形断面柱（4面ボックス）と冷間プレス成形角型鋼管（プレスコラム）がそれぞれ上記の製作方法に該当するが、日本では主に溶接箇所が少なく使用鋼材量も低減でき、コスト面でメリットがあるということから、プレスコラムが主流となっている。しかし、現在、製造できるサイズが1000mmまでという設備的な制約があるため、それ以上のサイズは4面ボックスで製作されているのが現状であり、超高層建築物の建設ラッシュを目前にして、一部の鋼管メーカーでは、1200mm（プレス曲げ加工自体は1400mmまで可能）以上の大径プレスコラムの生産に着手している。

話を戻し、第2次TRUレポート（2005年）

の廃棄体パッケージAの概念図では、容器の角部はピン角のような形状で描かれているが、実際に量を前提に製作することになった場合、コスト的なメリットから後者の製作方法になることと思われる。同様に、NUMO 包括的技術報告書（2021年）における廃棄体パッケージBにおいても、後者の製作方法にすることで経済的なメリットが大きいことが見込まれる。

質問8 固型化方法について、

- セメント固化とモルタル固化はどのように使い分けるのか。
- アスファルト固化は旧動燃の事故で使用しなくなったと理解しているが、まだ使用する／しているのか。
- 廃銀吸着材は種々固化法が開発されていたと思うが、セメント固化の方が比較的評価が高かったのか。

回答8

- TRU 廃棄物や低レベル放射性廃棄物では、セメントで固化した廃棄物として均質固化体（濃縮廃液、使用済み樹脂、焼却灰等）と充填固化体（金属類等の固体状廃棄物）の2種類の形態がある。TRU 廃棄物のグループ1（廃銀吸着材）のセメント固化体は上記の分類では均質固化体に該当する。そのため、説明が不十分で混同させてしまったが、均質固化体（セメント固化）と充填固化体（モルタル固化）とで使い分けているということになります。
- TRU 廃棄物のアスファルト固化体（グループ3の硝酸絵を含む濃縮廃液）については、JAEA で発生したアスファルト固化体が対象となる。ご指摘のように、現在は、アスファルト固化は実施していない。一方、発電所で発生する低レベル放射性廃棄物では現在もアスファルト固化しているものが存在する。
- 廃銀吸着材については、レファレンスは OPC（普通ポルトランドセメント）ベースの均質固化体とされている。これに対して、よりヨウ素の放出速度の低い代替固化体として HIP 固化、BPI ガラス固化等数種類の固化技術の開発を検討しており、そのうちの一つでアルミナセメントをベースとした固化技術をセメント固化技術という。そのため、OPC ベースのレファレンスのセメント固化と代替固化技術の一つであるアルミナセメントベースのセメント固化を区別して説明する。レファレンスのセメント固化した廃棄物に比べる

と、各種代替固化した廃棄物のほうがヨウ素の放出率の観点では優れている。一方、代替固化の中でアルミナセメント固化が特に優れているというわけではなく、処分環境によって一長一短があるという認識である。また、アルミナセメント固化は発熱量が大きいという課題もある。

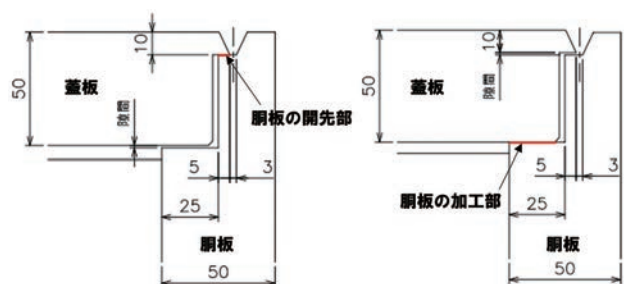
質問9 十字鋼板を設ける目的・必要性は何か。また、胴板同士の溶接時はタブ板を用いていたが、胴板と底板・蓋板の溶接時の開始点、終了点の品質等、特に問題ないのか。

オーバーパックも同様かと思うが、特に蓋板の溶接については裏ハツリができないが、溶込不良等の欠陥が発生しない対策等はどのようにしているのか。UT 検査の結果、欠陥は確認されなかったとのことだが、上記のような箇所について、事前に模擬試験等で断面等を切断し、UT との比較等、行われているのか。

回答9 容器内部の十字鋼板については、外圧作用時に上下面及び側面の中央が内側に凹むような変形を防止することで、耐圧性の向上のために設けている。

蓋板の溶接では、始点又は終点は、前層の始点及び終点と重ならないような施工方法を採用している。また、胴板と底板の溶接では、裏ハツリ後と周溶接後にそれぞれ非破壊検査を実施し溶接品質に問題ないことを確認している。

蓋板の溶接における初層溶接部の溶込不良については、蓋構造の検討時にすでに想定しており、当初、溶接欠陥のリスクを回避するため、下図の左のように機械加工する際の基準面を開先部にして、蓋板を胴板の開先部に乗せる構造としていた。しかし、その後の検討で、胴板の加工部に蓋板を乗せる構造にした方が外圧に対する耐圧性に優れていたため、下図の右のように形状変更した。

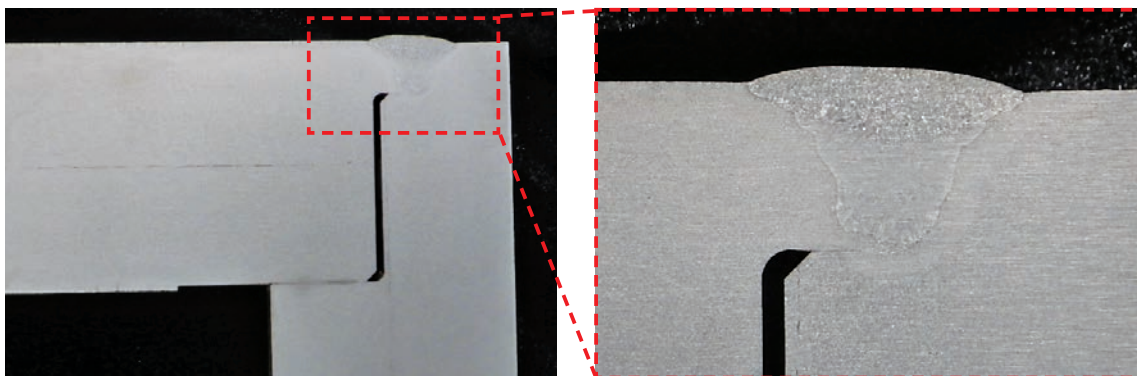


蓋部形状の検討

この形状変更に伴い、再度、溶接欠陥のリスクについて検討したところ、蓋板底面の胴板と接する部位についても機械加工を行い、平面度および寸法精度を機械加工精度で管理することで、加工公差による隙間の最大値は1.2 mmで収まることになり、仮に当該部に1.2 mmの隙間が生じたとしても、ティグ溶接の熔融プールの方が大きいいため、隙間が原因となる初層溶接部の溶込不良等の欠陥が発生する可

能性は極めて小さいという結論に至っている。参考として、下図に実規模廃棄体パッケージの解体後の溶接部断面を示すが、初層溶接部の溶込みに問題ないことを確認している。

蓋溶接部の UT 検査については、ティグ溶接により発生し得るきずを模擬した人工きずを付与した試験体を製作し、UT 検査結果の検証を実施している。



実規模廃棄体パッケージの溶接部断面

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号（ニチレイ明石町ビル12階）
TEL 03-6264-2111（代表） FAX 03-5550-9116
ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>